

ANÁLISIS DEL EFECTO ARCO EN SUELOS NO-COHESIVOS A PARTIR DE MODELOS NUMÉRICOS CONTINUOS (FLAC) Y DISCRETOS (PFC2D)

Salvador Senent^{1*}, José V. Lemos² y Rafael Jimenez¹

1: Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno
E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid
c/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España.
e-mail: {s.senent,rafael.jimenez}@upm.es, web: <http://www.caminos.upm.es/>

2: Departamento de Barragens de Betão
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal
e-mail: vlemos@lnec.pt web: <http://www.lnec.pt>

Palabras clave: Trapdoor, Dilatancia, Efecto Arco, FLAC, PFC2D,

Resumen *En este trabajo se presenta un estudio del ensayo "Trapdoor" mediante modelización numérica, empleando para ello dos modelos, uno continuo, construido con el código FLAC, y otro discreto, construido con el código PFC2D. Se incide en las diferencias de ambas metodologías a la hora de analizar un problema de rotura activa en el que la pérdida de material tiene un efecto significativo, como es el caso del ensayo "Trapdoor". Por un lado, el modelo continuo no representa fielmente la realidad del fenómeno, puesto que no considera la pérdida de material. Esto es especialmente importante en el caso de materiales con ángulos de dilatación bajos en los que se produce una evolución de la rotura a partir de un primer arco estable. Sin embargo, el modelo discreto presenta importantes dificultades para asignar las propiedades macromecánicas del material, lo cual limita notablemente la posibilidad de realizar estudios paramétricos sobre las variables que caracterizan el material.*

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los ensayos más sencillos para estudiar el efecto arco es el denominado ensayo *Trapdoor*, conocido internacionalmente a partir de la presentación que hizo de él Terzaghi en el primer congreso ICSMFE [1]. Este ensayo consiste en hacer descender una trampilla situada en la base de un contenedor donde se encuentra el material de estudio, controlando la carga que éste ejerce sobre la trampilla. La resistencia al corte tiende a mantener en su posición el material que cede, reduciendo la presión sobre la parte de la base que se desplaza y aumentándola en la parte fija.

Conjuntamente con el gran número de trabajos en la literatura en los que se presentan resultados de este ensayo [e.g., 2-3], muchos autores han llevado a cabo modelizaciones numéricas con diversos objetivos, como conocer mejor la influencia de las diferentes variables (geométricas, deformacionales y resistentes) que intervienen en el problema o para contrastar los resultados de laboratorio. Estas simulaciones se ha llevado a cabo mediante modelos continuos [e.g., 4] o, más recientemente, mediante modelos de elementos discretos [e.g., 5]. Cada una de estas dos técnicas presenta una serie de ventajas e inconvenientes, originadas en la forma de simular el comportamiento del material y reflejadas en las diferentes etapas de la modelización, desde la construcción del modelo hasta el procesamiento de los resultados.

En este trabajo se analizan las diferentes limitaciones y dificultades que presenta cada una de estas técnicas de modelización en la simulación del efecto arco en un ensayo *Trapdoor*. Para ello se han construido dos modelos, uno continuo, mediante el programa de diferencias finitas FLAC [6], y otro discreto, mediante el programa de elementos discretos, PFC2D [7]. Ambos códigos pertenecen a la empresa Itasca y son muy utilizados en la modelización de problemas geotécnicos.

2. MODELO CONTINUO (FLAC)

La Figura 1 muestra el modelo empleado en FLAC. Se trata de un análisis en deformaciones planas, en el que únicamente se ha representado la mitad del contenedor aprovechando la simetría del problema. Las dimensiones totales del contenedor son 50 cm de ancho por 20 cm de alto, siendo el ancho de la trampilla de 10 cm. (Este modelo coincide con el empleado por dos de los autores en [8]).

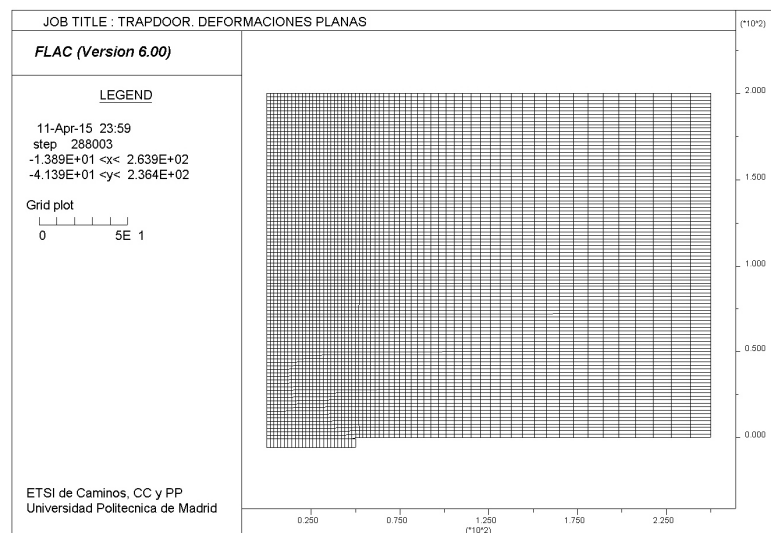


Figura 1. Modelo numérico continuo (FLAC).

Las propiedades del material vienen dadas por una densidad de $\rho = 1,6 \text{ g/cm}^3$, unos parámetros elásticos $E = 6 \text{ MPa}$ y $\nu = 0,30$ y un ángulo de rozamiento $\phi = 40^\circ$. Se ha supuesto un material elástico - perfectamente plástico caracterizado por el criterio de rotura de Mohr-Coulomb. En todos los casos se ha considerado una cohesión nula. Debido a la influencia que tiene en el resultado del ensayo la ley de fluencia del material se han considerado tres situaciones: (i) comportamiento asociado ($\varphi = \phi = 40^\circ$); (ii) comportamiento no-asociado con dilatancia nula ($\varphi = 0^\circ$); y (iii) comportamiento no-asociado con dilatancia distinta de cero ($\varphi = 5^\circ$). A continuación se muestran los resultados en cada uno de estos análisis y las valoraciones que de ellos se desprenden.

2.1. Modelo asociado

En la Figura 2 se muestra el mecanismo de rotura obtenido en el modelo numérico a partir de la distribución de las deformaciones por cortante. El mecanismo concuerda notablemente bien con el mecanismo teórico propuesto por varios autores [e.g., 9] y que se puede obtener mediante la aplicación de la teoría del Análisis Límite: un triángulo isósceles de abertura igual al doble del ángulo de rozamiento.

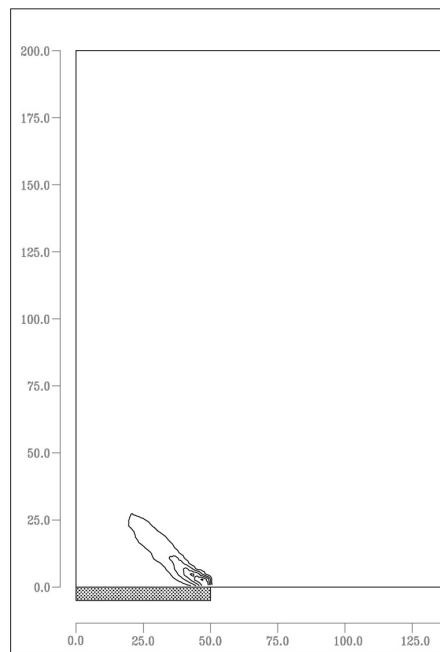


Figura 2. Mecanismo de rotura para el caso asociado obtenido a partir de la distribución de las deformaciones por cortante. (Modelo de FLAC).

La presión ejercida por el material sobre la trampilla en función del desplazamiento de ésta se muestra en la Figura 3. Para el caso de flujo asociado el valor tiende al obtenido teóricamente mediante el Análisis Límite. Como se mostró en [8], la forma de la curva viene condicionada por el estado tensional inicial y corresponde con la formación de un primer mecanismo de rotura y una evolución posterior hacia la solución teórica.

Una vez que se ha producido la rotura, los desplazamientos se concentran en el mecanismo de rotura, quedando el resto del modelo prácticamente inmóvil. En los elementos situados a lo largo de la superficie de rotura se produce una deformación por cortante continua que posibilita el desplazamiento de la parte móvil del material respecto a la parte fija.

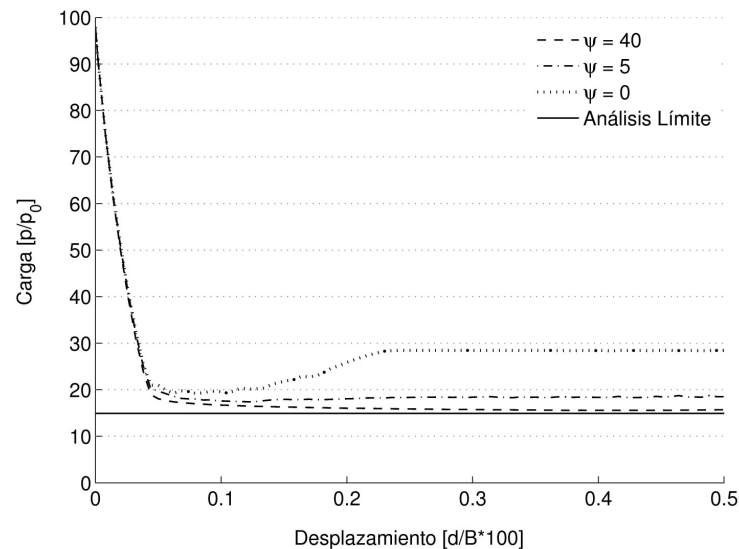


Figura 3. Evolución de la carga ejercida por el material sobre la trampilla en los modelos de FLAC. (p : carga sobre la trampilla; p_0 : carga geostática inicial; d : desplazamiento vertical de la trampilla; B : ancho de la trampilla)

Debido a que se ha considerado un material elástico - perfectamente plástico, ocurren dos fenómenos que repercuten en la geometría de rotura. En primer lugar, las propiedades del material que forma el arco estable no sufren ninguna degradación. El desplazamiento de la cuña inestable produce una relajación, y con ello una deformación, en los elementos que forman el arco estable y esto, en el caso de un material con reblandecimiento, provocaría la reducción de sus propiedades. Esta reducción alteraría la forma del arco estable, pero al tener el material una plasticidad perfecta este fenómeno no ocurre. En segundo lugar, los elementos que componen el mecanismo de rotura son capaces de mantener un estado tensional, transmitiendo esfuerzos sobre el material fijo y condicionando la geometría de rotura. Como se verá más adelante, estos fenómenos no se pueden dar en un modelo de partículas, con las ventajas e inconvenientes que ello conlleva, puesto que es inevitable la alteración del material con su deformación y, al dispersarse el material, se elimina cualquier transmisión de esfuerzos entre el mecanismo de rotura y el arco estable.

2.2. Modelo no-asociado con dilatación nula

Como muestra la Figura 3, en el caso de un material no-asociado con dilatación nula, la presión ejercida sobre la trampilla presenta un mínimo para luego ascender hasta un valor residual en el cual se mantiene constante. Este valor residual, de aproximadamente un 29 %

de la presión geostática inicial, concuerda razonablemente con el valor estimado teóricamente [e.g., 9] empleando un coeficiente de empuje horizontal $K = 1.0$ ($p/p_0 = 35,9\%$). (Este coeficiente de empuje se ha impuesto en la primera fase del modelo, correspondiente al asentamiento del material). La forma de la curva es similar a la obtenida en ensayos de laboratorio sobre muestras compactadas.

El mecanismo de rotura finalmente obtenido en el modelo, Figura 4, es el esperado en el caso de dilatación nula: rotura, desde el borde la trampilla, por paredes verticales. Si se sigue la evolución del mecanismo de rotura durante el ensayo se puede ver que se produce un primer mecanismo de rotura en forma de cuña triangular, coincidente con el mínimo de la curva carga-desplazamiento, para luego progresar hasta el mecanismo mostrado en la Figura 4. En [8] se muestra en más detalle cómo se produce la evolución del mecanismo de rotura para esta situación.

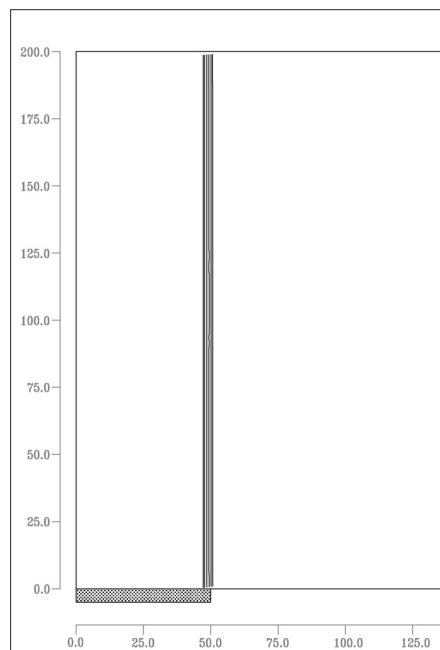


Figura 4. Mecanismo de rotura para el caso no-asociado con dilatación nula obtenido a partir de la distribución de las deformaciones por corte. (Modelo de FLAC).

Al igual que en el caso asociado, el mecanismo de rotura finalmente adoptado se ve condicionado por el comportamiento supuesto en el material (elástico-perfectamente plástico). Aunque en este caso se produce una evolución del mecanismo de rotura hasta la situación límite dada por un ángulo de dilatación nulo (no es posible una reducción por debajo de este valor), sería imposible mantener una pared vertical libre en un material granular. Esto se debe, como ocurría en el caso asociado, a que el material movilizado en el mecanismo de rotura sigue siendo capaz de transmitir esfuerzos sobre el material que permanece fijo.

2.3. Modelo no-asociado con dilatancia distinta de cero

En el caso en el que el ángulo de dilatancia toma un valor pequeño pero no-nulo ($\psi = 5^\circ$), la presión sobre la trampilla, Figura 3, tiende a un valor intermedio entre los dos casos extremos (flujo asociado y dilatancia nula). Sin embargo, no llega a estabilizarse completamente, sino que presenta pequeñas fluctuaciones. La razón de estas oscilaciones se puede encontrar a partir del análisis de la geometría de rotura. Como se muestra en la Figura 5, aunque para un estado avanzado del ensayo, con un desplazamiento de la trampilla del 0.40 %, se obtiene un mecanismo de rotura de paredes casi verticales, posteriormente (desplazamiento del 0,52 %) se vuelve a un mecanismo de paredes inclinadas y dimensiones más reducidas. (La figura también muestra las concentraciones de deformaciones por cortante, en forma de franjas horizontales, que se producen al pasar de un mecanismo al otro).

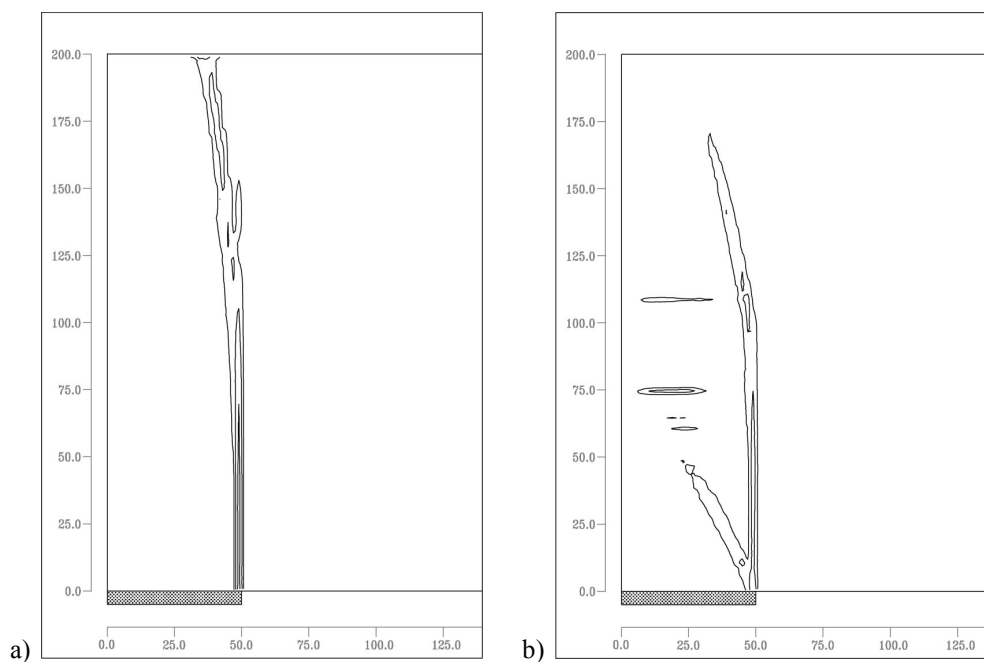


Figura 5. Mecanismo de rotura para el caso no-asociado con dilatancia distinta de cero obtenido a partir de la distribución de las deformaciones por cortante: (a) para un desplazamiento de la trampilla del 0,40 %; (b) para un desplazamiento de la trampilla del 0,52 %. (Modelo de FLAC).

No se ha encontrado una explicación completa de este fenómeno. Parece deberse a que ambos mecanismo de rotura son posibles y, debido al proceso de cálculo propio de FLAC, en el que las tensiones se transmiten entre elementos de manera progresiva, los distintos mecanismos de rotura sufren procesos de carga y descarga a la vez que de desaceleración y aceleración. (Quizás debidas al procedimiento empleado para modelizar el ensayo y particularmente la trampilla; ver [8] para más detalles). Estas oscilaciones dependen de la configuración del ensayo; así, para análisis axil-simétricos, los cuales no se reproducen en este trabajo, las fluctuaciones de la carga ejercida sobre la trampilla son mucho mayores.

3. MODELO DE ELEMENTOS DISCRETOS (PFC2D)

3.1. Definición de las propiedades

Una de las características más conocidas de los modelo de partículas es que no se pueden imponer directamente las propiedades macro-mecánicas del material, ya sean las propiedades elásticas (E , ν) o las resistentes (ϕ , en el caso de considerar un material no-cohesivo). Se debe elegir un modelo para el contacto entre partículas y a partir de él definir las propiedades del contacto.

Estas propiedades a nivel micro-mecánico condicionan las propiedades macro-mecánico del material, pero no existe una relación directa entre unas y otras, puesto que intervienen otras variables como el tamaño de las partículas y el empaquetado de las mismas. Es necesario, entonces, modelizar ensayos de laboratorio, como ensayos de compresión o de corte, para determinar, al igual que si estuviésemos en el laboratorio, las propiedades macro-mecánicas del material.

En este trabajo se han modelizado ensayos de compresión, siguiendo el procedimiento descrito en [10]. Para ello se han empleado las funciones predefinidas que constituyen el *PFC Fishtank*. Previamente a la realización de los ensayos, es necesario generar la muestra de material. Aunque esto se puede llevar a cabo mediante un depósito por gravedad, dejando caer las partículas en un recipiente, éste es un procedimiento muy costoso en tiempo y que complica la obtención de muestras densas o con un determinado estado tensional inicial. En consecuencia, se han empleado las funciones definidas en el *PFC Fishtank* que, de manera resumida, llevan a cabo las siguientes fases: (i) colocación de las partículas en el recipiente; (ii) variación del tamaño de las partículas para conseguir el estado tensional isotrópico inicial; (iii) reducción del número de partículas “flotantes” (con menos de tres contactos); y (iv) finalización de la muestra con la imposición de las propiedades de los contactos. Este procedimiento, aunque permite generar la muestra en un tiempo menor, conlleva una serie de inconvenientes, como la presencia de partículas “flotantes” o, como se comentará más adelante, la variación de la porosidad fijada inicialmente en el caso de emplear partículas compuestas.

La determinación de las propiedades macro-mecánicas del material a partir de las propiedades de los contactos entre partículas conlleva una serie de limitaciones. Es decir, hay una serie de conjuntos de propiedades que no se pueden obtener. En la mayoría de los casos son limitaciones lógicas y que representan acertadamente la realidad, pero limitan la versatilidad de los modelos de partículas. Como se explica a continuación, existe una serie de análisis que no se pueden realizar. Las limitaciones que se han encontrado durante la realización de este trabajo son las siguientes:

- Actuando únicamente sobre los parámetros básicos que definen el modelo del contacto entre partículas, fundamentalmente el coeficiente de fricción (μ) y la relación entre el radio mínimo y el radio máximo ($r_{m\acute{a}x}/r_{m\acute{i}n}$), no se pueden obtener ángulos de rozamiento muy elevados ni ángulos de dilatación similares al ángulo de rozamiento. A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 6, los valores del ángulo de rozamiento (ϕ) y

del ángulo de dilatancia (ψ) obtenidos para distintos valores de μ . Esta limitación implica que sea difícil modelizar un ensayo *Trapdoor* en condiciones de flujo asociado.

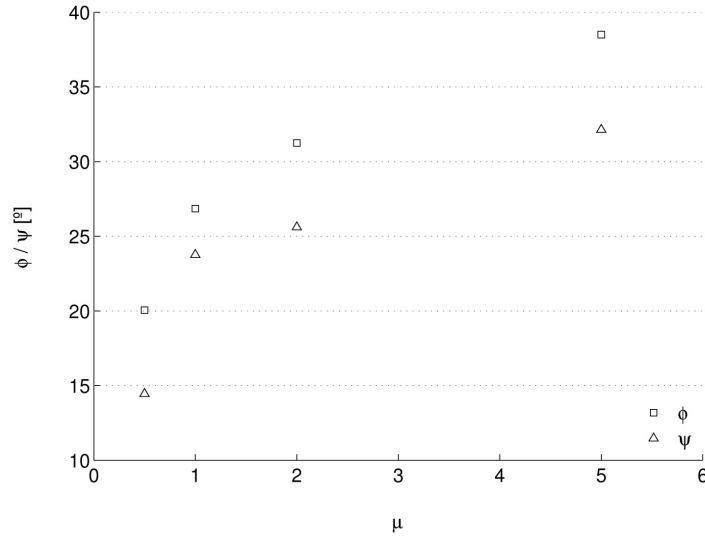


Figura 6. Variación del ángulo de rozamiento (ϕ) y del ángulo de dilatancia (ψ) en función del coeficiente de fricción (μ) entre partículas.

- Debido a que el comportamiento del material depende del conjunto de propiedades micro-mecánicas, no se puede independizar el cálculo de una determinada propiedad macro-mecánica. Así, por ejemplo, el ángulo de rozamiento y la dilatancia están correlacionados, de tal forma que si se incrementa el valor de una de ellas, también aumenta la otra (Figura 6). Esto supone que no se pueda conseguir un material resistente, con un ángulo de rozamiento elevado, pero a la vez fuertemente no-asociado.
- No es posible modelizar un material con unas propiedades constantes a lo largo de todo el ensayo. Como las propiedades macro-mecánicas dependen del empaquetado de la muestra, al producirse el movimiento de las partículas durante el ensayo se modifica el estado del material y con ello sus propiedades. Obviamente este es un fenómeno real, que se refleja en los ensayos de laboratorio en los que se produce una reducción de las propiedades pico a las residuales. Sin embargo, imposibilita modelizar un material elástico-perfectamente plástico y, con ello, poder comparar los resultados obtenidos con teorías como la del Análisis Límite.

Debido a estas limitaciones, fundamentalmente la primera, no fue posible obtener en las primeras simulaciones del ensayo *Trapdoor* un arco estable. Por lo tanto, se buscaron metodologías que permitiesen aumentar los valores del ángulo de rozamiento y de la dilatancia. A continuación se comentan las dos técnicas que se han estudiado: (i) restricción del giro de las partículas; y (ii) utilización de partículas compuestas (o *clumps*).

3.1.1. Restricción del giro de las partículas

La coacción del giro de las partículas es una técnica habitualmente empleada en las modelizaciones mediante elementos discretos para tener en cuenta la forma arbitraria de las partículas. En la realidad, las partículas no son perfectamente esféricas, por lo que al tratar de girar unas sobre otras surgen coacciones. Representar las formas reales de las partículas suele ser muy costoso en tiempo y en algunos códigos prácticamente inviable. Debido a ello muchos autores imponen una restricción al giro que trata de simular este efecto. En [11] se muestran algunas de las técnicas empleadas a tal fin, basadas la mayoría de ellas en aplicar un momento sobre la partícula de sentido contrario al giro. En algunos casos, por ejemplo, este momento es proporcional a las fuerzas de contacto normales, mientras que en otros es proporcional, además, a la velocidad angular relativa en el contacto.

En este trabajo se emplea, por su sencillez, la metodología propuesta por [12]. Estos autores proponen un coeficiente de retardo (k_λ) el cual actúa sobre la velocidad angular (ω) según la siguiente expresión:

$$\omega_i^{t+1} = k_\lambda^\xi \cdot \omega_i^t \quad (1)$$

Donde ξ es el tiempo de retardo discretizado, igual al paso de tiempo de cálculo (Δt) dividido por el tiempo de retardo (λ); siendo este último el lapso de tiempo en el que se reduce la velocidad angular ω . El coeficiente de retardo es función del número de contactos de la partícula (c) mediante la siguiente expresión:

$$k_\lambda = \frac{1}{1+c^n} \quad (2)$$

Donde n es un parámetro que gobierna la sensibilidad del coeficiente de retardo al número de contactos. Si $n = 0$, k_λ es igual a 0.5 e independiente del número de contactos.

Los dos parámetros que se han de definir son, por lo tanto, λ y n . La coacción sobre el giro será mayor al aumentar n (aumentar el efecto del número de contactos) y disminuir λ (aumentar la frecuencia de aplicación del coeficiente de retardo).

La introducción de esta restricción al giro aumenta, como era esperable, el ángulo de rozamiento en los ensayos a compresión. En la Figura 7 se muestra la variación del ángulo de rozamiento (ϕ) y de la dilatancia (ψ) en función de λ para dos valores de n . A la vista de estos resultados es posible fijar, mediante los parámetros λ y n , el valor deseado para el ángulo de rozamiento, aunque afectando también al ángulo de dilatancia.

Sin embargo, parece que restringir el giro de las partículas según la velocidad de rotación de las mismas, la cual dependerá de la velocidad a la que se realice el ensayo, hará que el ángulo de rozamiento obtenido sea función de las condiciones del ensayo, particularmente de la velocidad a la que se efectúe. Debido a ello, se analizó como variaba el ángulo de rozamiento en función de la velocidad del ensayo. Estos resultados se muestran en la Figura 8. Cuando no se coacciona el giro, el ángulo de rozamiento obtenido es constante e independiente de la velocidad. Por el contrario, al coaccionar el giro, sí influye la velocidad del ensayo, de tal forma que cuanto mayor es la velocidad, mayor es la coacción y mayor el ángulo de rozamiento obtenido.

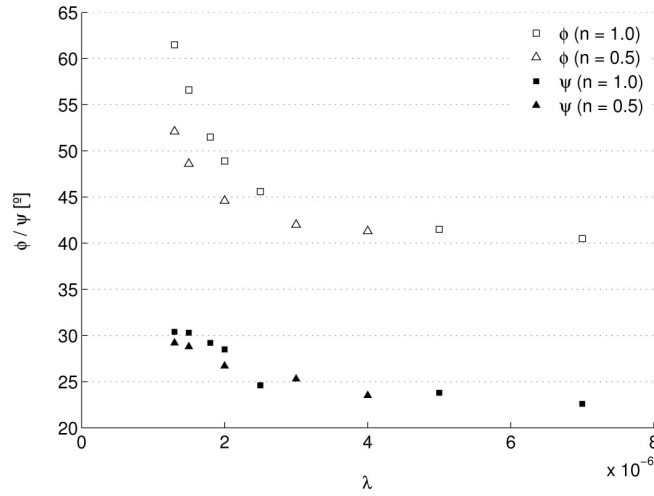


Figura 7. Variación del ángulo de rozamiento (ϕ) y del ángulo de dilatancia (ψ) en función de los parámetros (λ y n) que determinan la coacción al giro de las partículas

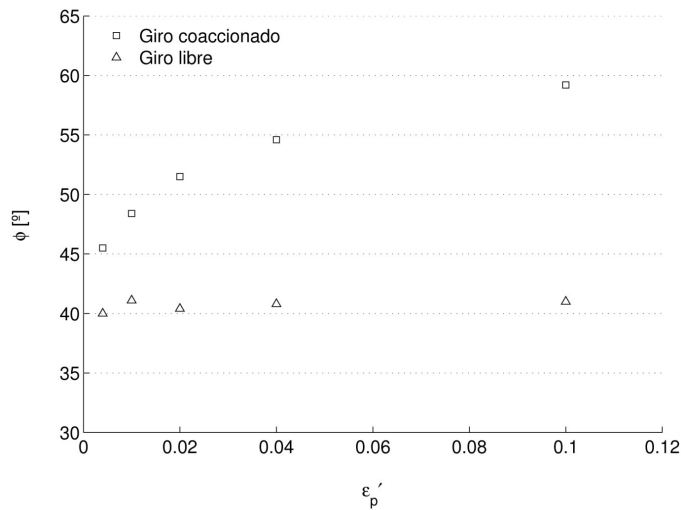


Figura 8. Variación del ángulo de rozamiento (ϕ) con la velocidad de deformación del ensayo de compresión (ϵ_p') según se coaccione o no el giro de las partículas.

A la vista de estos resultados no se consideró adecuado emplear esta metodología para aumentar el ángulo de rozamiento del material. Sería necesario, por lo tanto, analizar las otras técnicas que existen para coaccionar el giro de las partículas, que, aunque son más representativas de la realidad, resultan más complicadas de implementar. Se debe indicar que en [12] se emplea la técnica analizada para estudiar el efecto de un obstáculo sobre una avalancha de material granular, en la que no hay como tal una velocidad de ensayo sino que la partículas se mueven aceleradas por la gravedad. Por lo tanto, el resultado obtenido aquí no invalida el citado trabajo.

3.1.2. Empleo de partículas compuestas (*clumps*)

La generación de partículas compuestas es un recurso habitual en los modelos numéricos de partículas, como por ejemplo en PFC2D donde la partícula básica es una esfera o un disco de espesor unidad [e.g., 13]. Mediante estos *clumps* se obtienen partículas irregulares que ofrecen una coacción al giro entre ellas, aumentando el rozamiento del material.

Hay que tener en cuenta que la utilización de estas partículas compuestas conlleva un coste computacional. Por lo general, cada partícula simple se sustituye por un *clump* formado por varias partículas, por lo que aumenta notablemente el número de contactos en el modelo. (Aunque no se calculen los contactos entre las partículas que componen el *clump*, no se pueden omitir los contactos externos).

En este trabajo se ha definido un *clump* formado por tres partículas del mismo radio r , situadas cada una de ellas en los vértices de un triángulo equilátero de lado d (Figura 9.a). De esta forma, siendo aleatoria la orientación de los ejes del *clump* cuando se reemplaza la partícula, se mantiene la isotropía de la muestra. Como cada *clump* cubre la misma área que la partícula sustituida (como partículas base se han empleado discos de espesor unidad), la única variable que se ha de definir es la relación d/r , que determina el grado de irregularidad de la partícula compuesta (Figura 9.b).

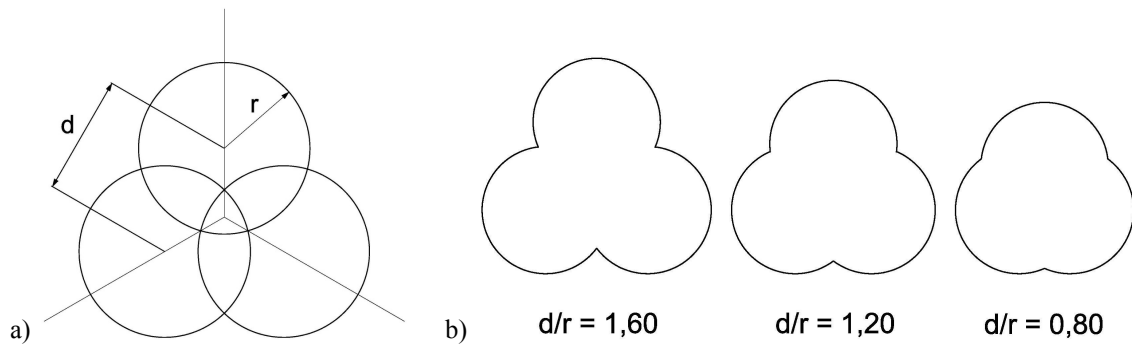


Figura 9. Partículas compuestas (*clumps*) empleadas: (a) variables que determinan su geometría; (b) variación del nivel de irregularidad en función de la relación d/r .

Aunque cómo se ha indicado, cada *clump* ocupa el mismo área que la partícula simple reemplazada, no se mantiene la porosidad de la muestra. Esto se debe al proceso seguido para la generación de las muestras (*PFC Fishtank*). Al colocar los *clumps* se generan superposiciones entre ellos que implicarían un estado inicial con tensiones muy elevadas, el cual se ajusta reduciendo el tamaño de las partículas y por lo tanto aumentando la porosidad de la muestra (Figura 10). La reducción inicial de la porosidad para valores d/r inferiores a 1 se debe al mejor ajuste que se puede obtener entre partículas para un estado tensional inicial determinado.

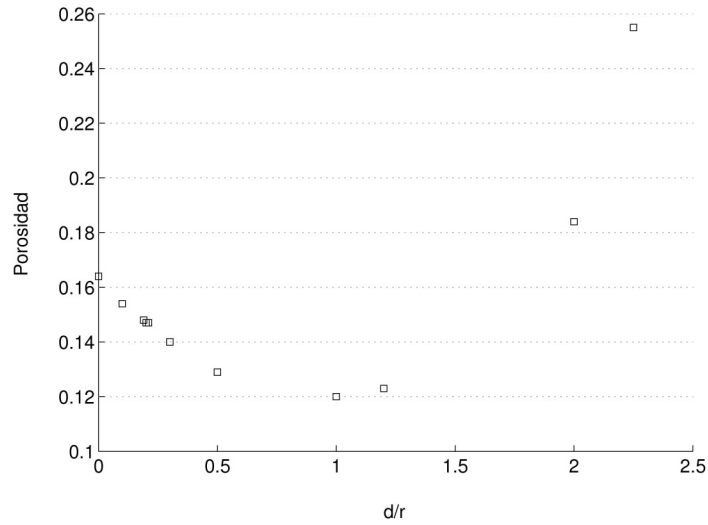


Figura 10. Variación de la porosidad según la relación d/r que determina la geometría de las partículas compuestas.

Mediante el empleo de las partículas compuestas se obtienen ángulos de rozamiento mayores (Figura 11). Como era esperable, al crecer la relación d/r aumenta los valores obtenidos. Igualmente, y como también se pretendía, crece el valor del ángulo de dilatación. Sin embargo, no se alcanza en ningún caso un comportamiento asociado. Al igual que en el caso de la coacción al giro, se ha analizado el efecto de la velocidad del ensayo en los resultados, sin que se encuentre ninguna dependencia que invalide el empleo de las partículas compuestas (Figura 12).

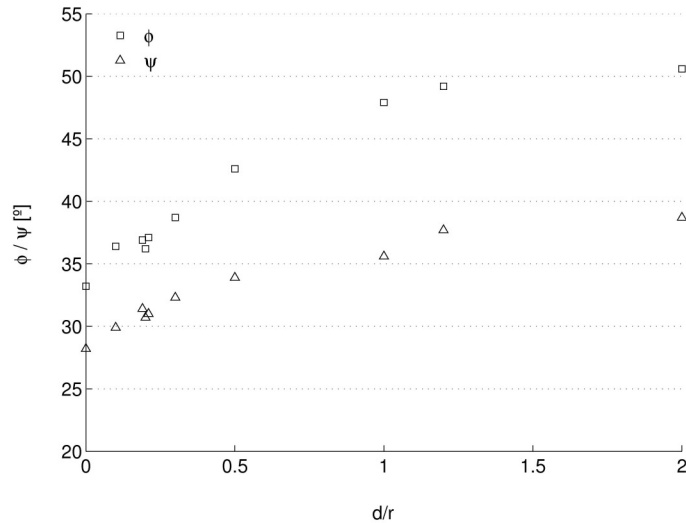


Figura 11. Variación del ángulo de rozamiento (ϕ) y la dilatación (ψ) según la relación d/r que determina la geometría de las partículas compuestas.

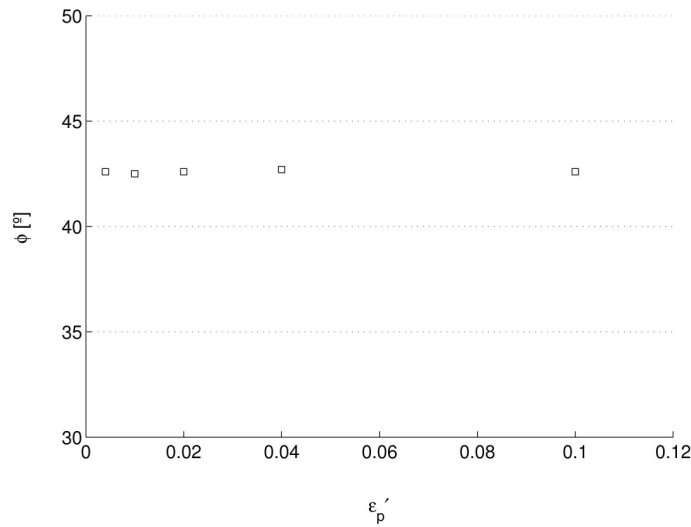
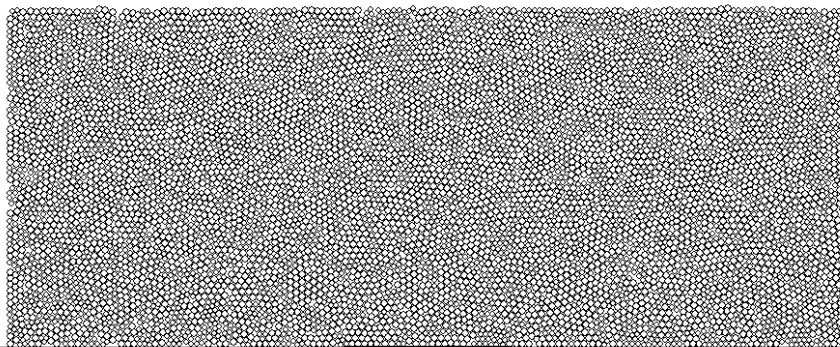


Figura 12. Variación del ángulo de rozamiento (ϕ) con la velocidad de deformación del ensayo de compresión (ϵ_p') en muestras con partículas compuestas.

3.2. Ensayo Trapdoor

3.2.1. Modelo numérico

En la Figura 13 se muestra el modelo empleado en PFC2D. Al igual que en el modelo continuo se ha modelizado una sección transversal del contenedor, aunque en este caso representando una sección completa. La geometría del modelo viene dada por su ancho total (25 cm), la altura del material (10 cm) y el ancho de la trampilla (5 cm). Para la base del contenedor se han empleado tres elementos *wall* de PFC2D. Sin embargo, las paredes del contenedor se han simulado mediante dos columnas de partículas a las que se les ha impedido el desplazamiento horizontal. De esta forma, y siguiendo una metodología similar al "*procedimiento para la instalación de tensiones*" propuesto en el *PFC Fishtank*, es posible imponer un estado tensional inicial en la muestra.



Trapdoor

Figura 13. Modelo discreto (PFC2D).

Las variables principales, a efecto del ensayo *Trapdoor*, que se han de definir para llevar a cabo la generación de la muestra según el *PFC FishTank* son las siguientes (se indican los valores empleados):

- Radio mínimo inicial de las partículas ($r_{min} = 1,3$ mm)
- Relación entre el radio mínimo y el radio máximo de las partículas ($r_{max}/r_{min} = 1,5$)
- Densidad de la muestra ($\rho_o = 1,6$ g/cm³)
- Módulo de elasticidad ($E_c = 30$ MPa)
- Relación entre la rigidez normal y tangencial de los contactos ($k_n/k_s = 4$)
- Coeficiente de rozamiento ($\mu = 0,5 - 5$)

El ensayo *Trapdoor* se simula mediante el descenso controlado del elemento *wall* que representa la trampilla a una velocidad constante (4 mm/ciclo), controlando la presión ejercida por las partículas sobre ese elemento. Debido a que la trampilla tiene una longitud fija, las partículas situadas sobre ella pueden caer por sus bordes. Mediante una función FISH (lenguaje de programación interno de PFC2D) estas partículas se eliminan del modelo y se suma su peso a la carga registrada sobre la trampilla. No obstante, desde que la partícula se separa de la trampilla hasta que se añade su peso, pasa una fracción de tiempo, por lo que la carga registrada oscila (además de por las fluctuaciones propias de un cálculo numérico).

3.2.2. Resultados

En ninguno de los ensayos con partículas simples se forma un arco estable por encima de la trampilla, a pesar de emplear coeficientes de fricción elevados. Igualmente, tampoco se forma el arco estable en el caso de partículas compuestas con relaciones d/r bajas ($d/r < 1$). Como ejemplo, la Figura 14 muestra el proceso de rotura en un ensayo con $d/r = 0,5$. Es necesario, entonces, acudir a partículas compuestas muy irregulares para que se pueda formar el arco estable. En la Figura 15 se muestra un caso con $d/r = 2,0$, en el que cada una de las partículas que compone el *clump* es tangente a las otras dos. No obstante, surgen dudas sobre la validez de este resultado.

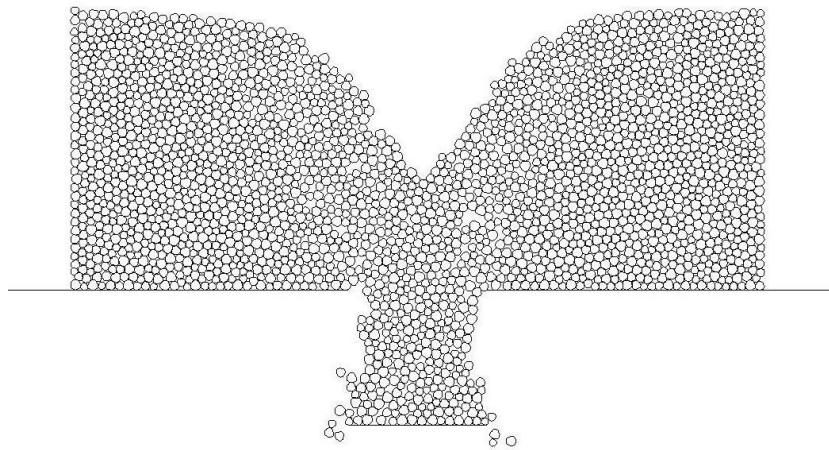


Figura 14. Proceso de rotura en un ensayo *Trapdoor* con partículas compuestas poco irregulares ($d/r = 0,5$).

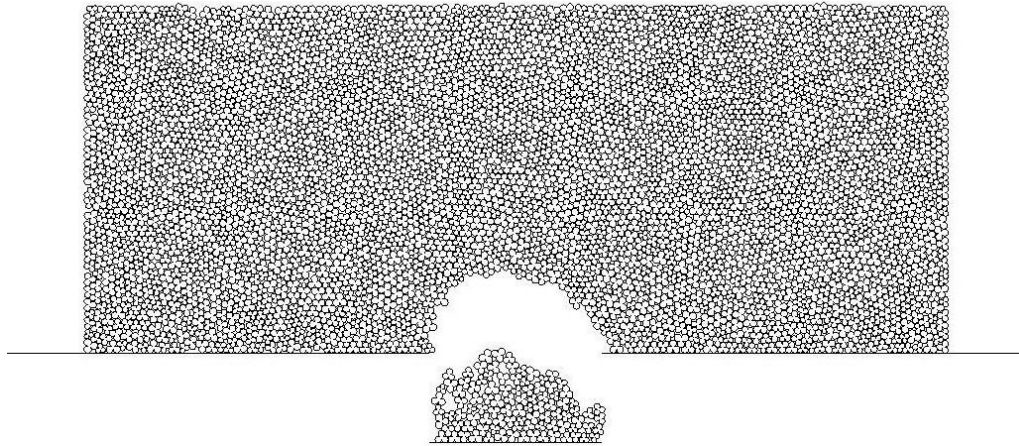


Figura 15. Formación de un arco estable en un ensayo *Trapdoor* con partículas compuestas muy irregulares ($d/r = 2,0$).

En el caso de partículas sencillas o poco irregulares, que no se forme el arco estable parece deberse a dos causas que actúan simultáneamente. Por un lado, no ha sido posible obtener un material completamente asociado, es decir, con un ángulo de dilatación igual al ángulo de rozamiento. Y por otro lado, lo cual parece más significativo, durante el ensayo se produce la inevitable reducción de las propiedades de un modelo discreto debido a la deformación del material. Estos resultados sobre muestras sencillas o poco irregulares sugieren que la deformación que se produce en el material siempre va a producir una reducción tal de las propiedades que imposibilite la formación del arco estable.

En el caso de muestras muy irregulares (Figura 15) cabe preguntarse si el arco estable aparece debido a que se forma una estructura resistente (en forma de arco) en el terreno o simplemente a un trabamamiento de las partículas. La inclinación del arco no se corresponde con las propiedades obtenidas en la modelización del ensayo de compresión ($\phi = 57^\circ, \psi = 38^\circ$) y, en cualquier caso, estas son las propiedades pico, no habiéndose apreciado una evolución del mecanismo de rotura hacia unas propiedades residuales. Asimismo, quizás el tamaño de las partículas sea muy grande en relación al ancho de la trampilla, lo cual favorece este trabamamiento. (Otra muestra de este fenómeno se encuentra en [10], donde se analiza la descarga de un material granular a través de una tolva, formándose un arco estable por el trabamamiento de las partículas). Para resolver estas dudas sería necesario calcular el modelo con un tamaño de partícula mucho menor, lo cual no se ha hecho debido a las exigencias computacionales (memoria de ordenador y tiempo de cálculo) que implicaría.

A pesar de lo anterior, el modelo con partículas muy irregulares muestra la transmisión de cargas en forma de arco por encima de la trampilla (Figura 16). (Sin embargo, esta transmisión se produce únicamente a través de una fila de partículas, por lo que vuelve a considerarse necesario emplear un modelo con un tamaño de partícula mucho menor). Igualmente la evolución de la carga sobre la trampilla muestra el comportamiento esperado, con un mínimo de la carga y un aumento hasta un valor superior en el que se estabiliza. El valor final, en torno al 23 % de la presión geostática, se encuentra entre los valores límites

(para flujo asociado, 8 %, y para dilatancia nula, 36 %) calculados a partir de las propiedades obtenidas del ensayo de compresión.

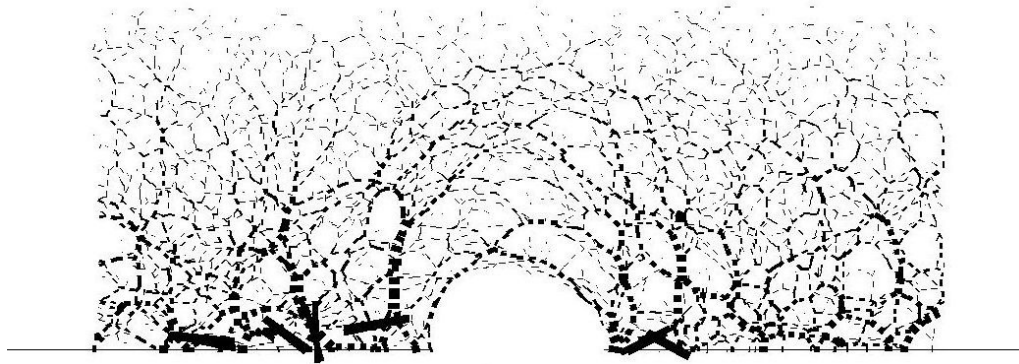


Figura 16. Esfuerzos normales entre partículas para el ensayo mostrado en la Figura 15.

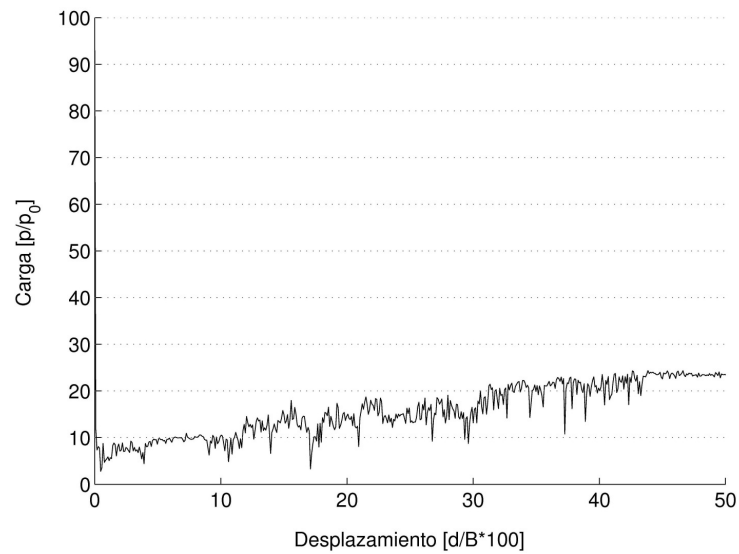


Figura 15. Variación de la carga sobre la trampilla para el ensayo mostrado en la Figura 15. (Las variables corresponden con las indicadas en la Figura 3).

4. CONCLUSIONES

En el trabajo presentado han quedado de manifiesto las diferencias que existen a la hora de desarrollar una simulación numérica con un código de elementos continuos, como FLAC, o con un código de elementos discretos, como PFC2D.

La complejidad que llevan aparejados los modelos discretos a la hora de fijar las propiedades macro-mecánicas del material, hacen que resulten más rentables los modelos continuos. Además, estos últimos permiten llevar a cabo análisis "teóricos", como en el caso de flujo asociado o comportamiento perfectamente plástico, los cuales no son posibles con los modelos de partículas. (No se debe olvidar que en este trabajo se ha considerado un material granular no-cohesivo, por lo que las valoraciones hechas quizás no sean válidas en otras situaciones).

Los resultados irreales que se han obtenido con el modelo de FLAC (como en el caso de una pared vertical estable) se han debido al comportamiento impuesto al material (plasticidad perfecta), por lo que parece razonable que con modelos más avanzados, en este caso con criterios de rotura con reblandecimiento, se modelize más acertadamente el comportamiento del material.

Sin embargo, en el caso más representativo de la realidad (material no-asociado con ángulo de dilatación distinto de cero), se ha encontrado una dificultad asociada al modelo de FLAC, puesto que se producen fluctuaciones del mecanismo de rotura que no parecen corresponderse con la realidad. Este inconveniente no aparece en el modelo de partículas donde la dispersión del material elimina cualquier efecto del material movilizado y permite simular el progreso de la rotura.

REFERENCIAS

- [1] K. Terzaghi. *Stress distribution in dry and saturated sand above a yielding trapdoor*. Proceedings of International Conference of Soil Mechanics, Harvard University, Cambridge, Vol. 1, pp. 307-311, (1936).
- [2] T. Tanaka y T. Sakai. *Progressive failure and scale effect of trap-door problems with granular materials*. Soils Found., Vol. 33, pp. 11-22, (1993).
- [3] G. Iglesia, H. Einstein y R. Whitman. *Validation of Centrifuge Model Scaling for Soil Systems via Trapdoor Tests*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 137, pp. 1075-1089, (2011).
- [4] R.D. Borst y P.A. Vermeer. *Possibilities and limitations of finite elements for limit analysis*. Geotechnique, Vol. 34, pp. 199-210, (1984).
- [5] B. Chevalier, G. Combe y P. Villard. *Experimental and numerical study of the response of granular layer in the trap-door problem*. Proceedings of the 6th international conference on micromechanics of granular media, Golden, Colorado, (2009).
- [6] Itasca Consulting Group, Inc. *FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)*, Version 6.0, (2008).
- [7] Itasca Consulting Group, Inc. *PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions)*, Version 4.0, (2008).
- [8] S. Senent y R. Jimenez. *Estudio mediante modelización numérica del efecto del estado tensional inicial del terreno en la carga de rotura de un ensayo "Trapdoor"*. CMN2013, Bilbao, España, (2013).

- [9] C.H. Evans. *An examination of arching in granular soils*. Master Thesis. Massachusetts Institute of Technology, (1983).
- [10] Itasca Consulting Group, Inc. *Manual PFC2D*, Version 4.0, (2008).
- [11] C.M. Wensrich y A. Katterfeld. *Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM*. Powder Technology, Vol. 217, pp. 409-417, (2012).
- [12] H. Teufelsbauer, Y. Wang, M.C. Chiou y W. Wu. *Flow-obstacle interaction in rapid granular avalanches: DEM simulation and comparison with experiment*. Granular Matter, Vol. 11, pp. 209-220, (2009).
- [13] M.J. Melis y L.E. Medina. *Discrete numerical model for analysis of earth pressure balance tunnel excavation*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 131, pp. 1234-1242, (2005).